

VALTER MAGGI
 PAOLA CASATI
 CHIARA UGLIETTI
 FEDERICA MARINO
 BARBARA STENNI
 ROBERTO UDISTI
 ONELIO FLORA

L'importanza ambientale dei ghiacciai italiani: esempio dal Colle del Lys (Monte Rosa)

Introduzione

Il recente sviluppo delle conoscenze sulle variazioni climatiche ed ambientali globali e delle loro relazioni con la composizione dell'atmosfera si basa in massima parte sull'analisi delle carote di ghiaccio estratte con perforazioni profonde sulle calotte polari. Dalla perforazione di Vostok in Antartide, dell'inizio degli Anni Settanta, a quelle più recenti di Summit (Groenlandia) all'inizio degli Anni Novanta e di Dome C (Antartide) a partire dal 1997, grandi sforzi sono stati intrapresi per l'analisi di queste carote che riflettono situazioni geografiche dove l'accumulo nevoso è per la quasi totalità conservato, dove non esistono praticamente fonti locali di inquinamento e dove si può procedere a ritroso nel tempo oltre i 400.000 anni fa (PETTIT *et al.*, 1999; JOUZEL *et al.*, 1993; GRIP MEMBERS, 1993; JOHNSEN *et al.*, 1992).

Anche dai ghiacciai collocati alle medie latitudini è possibile ottenere informazioni utili e complementari rispetto a quelle delle calotte polari (DELMAS, 1992). Alcune di queste aree si trovano collocate in zone a maggiore antropizzazione, quindi è possibile ottenere informazioni non solo climatiche, ma in particolare dell'impatto dell'uomo. In questo contesto le Alpi, situate in una regione di antico e intenso popolamento e di fitta

industrializzazione, occupano un posto privilegiato. Anche se l'accumulo nevoso sui ghiacciai alpini è spesso influenzato dalle condizioni meteorologiche locali, i record cronologici ottenibili sono molto attendibili e coprono archi temporali tali (da alcuni decenni a qualche secolo) da costituire un insostituibile archivio naturale sulla storia dell'impatto antropogenico sull'atmosfera e sull'ambiente europeo.

Il Colle del Lys e le perforazioni in ghiaccio in area Alpina

I siti dove condurre perforazioni in ghiaccio sulle Alpi sono non sono molti; le quote devono infatti essere molto elevate (al di sopra dei 4.000 m), dove la temperatura sale raramente sopra gli 0°C e quindi gli effetti della percolazione per fusione sono ridotti (ghiacciai "freddi") (HAEBERLI, ALEAN, 1985). Inoltre, la morfologia del ghiacciaio deve essere tale (selle o calotte) da minimizzare le deformazioni della stratigrafia del ghiaccio dovute ai veloci movimenti delle masse glaciali e da permettere l'installazione di campi di perforazione. Fino al 1996 i siti considerati avere tali caratteristiche sono stati solo due; il primo è il Colle Gnifetti (4450 m) fra la

Punta Zumstein e la Punta Gnifetti nel massiccio del Monte Rosa, sul confine italo-svizzero, il secondo è il Col du Dôme (4250 m) nel massiccio del Monte Bianco in Francia (HAEBERLI *et al.*, 1988; MAUPETIT *et al.*, 1995).

Nell'estate 1996 è stata effettuata una nuova perforazione, di 80 metri di profondità, sul Colle del Lys a circa 4250 metri nel gruppo del Monte Rosa (fig. 1) (ROSSI *et al.*, 1998; MAGGI *et al.*, 2000; SMIRAGLIA *et al.*, 2001). Esso costituisce il bacino di accumulo del Ghiacciaio del Lys che scende verso Sud-Ovest, nella Valle di Gressoney. Il Colle del Lys rappresenta anche uno dei bacini di alimentazione del Ghiaccio di Gorner, che scende verso Nord, in Svizzera. L'esistenza di una piccola zona semipianeggiante, e quindi con flussi orizzontali limitati, sia negli strati superficiali che in quelli più profondi, permette di ottenere un accumulo poco disturbato dai movimenti del ghiaccio stesso.

La sonda di perforazione utilizzata è di tipo elettromeccanico, con sistema carotiere-motore di rotazione-antitorchio tutto a fondo foro. Tali sistemi sono in uso da circa 30 anni e sono stati applicati sia su strumenti

per perforazioni profonde (Antartide e Groenlandia), che per l'ottenimento di carote superficiali. I segnali elettrici vengono trasferiti al motore attraverso un cavo coassiale di 150 m. L'alimentazione del carotiere avviene con elettrodi interni, mentre una guaina esterna in acciaio assicura la protezione e tenuta del cavo. Il sistema è montato su una torre di perforazione che, da una posizione verticale in fase di carotaggio, può ruotare in posizione orizzontale, per la manutenzione e il prelievo delle carote.

Discussione dei dati

La datazione della carota è stata effettuata utilizzando due metodi incrociati. Sfruttando gli orizzonti di riferimento (*reference horizons*; WAGENBACH, 1989), come il massimo delle deposizioni di trizio (^3H) causate dagli effetti di *fallout* delle esplosioni termonucleari in atmosfera (massima attività: 1963) e la presenza di livelli visibili di polveri riferite ad intensi trasporti di materiale dal Nord Africa e ben noti in letteratura (nel 1977 e 1987), è stato possibile otte-

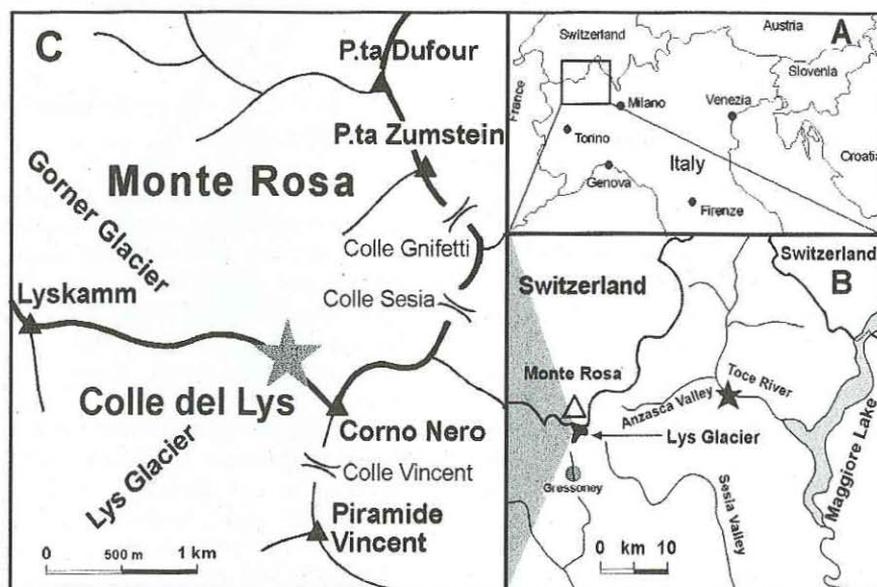


Fig. 1 – Mappa della posizione del colle del Lys e della perforazioni effettuate nel 1996 (stella).

nere un accumulo nevoso medio dell'area studiata di 1.6 ± 0.1 metri di acqua equivalente, e di datare la base della carota all'inizio degli anni '50 (fig. 2). A causa, però, della scarsa qualità meccaniche della parte più profonda della carota, è stato possibile ottenere un record continuo solo dai primi anni 70.

Misure isotopiche (spettrometria di massa) e chimiche (cromatografia ionica) hanno inoltre permesso di ottenere una più precisa datazione stratigrafica, utilizzando la variabilità stagionale di alcuni composti. Gli isotopi stabili dell'ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$) risultano essere proporzionali alla temperatura dell'aria che ha formato la precipitazione nevosa, per cui variano stagionalmente con il variare della temperatura dell'aria. L'ammonio (NH_4) invece, fortemente legato alla fotochimica atmosferica ed ai trasporti di componenti antropici dalle aree di pianura, cambia durante l'anno sia per le differenti intensità e durata dell'irraggiamento giornaliero sia per la differente quota dello strato limite planetario, la cui posizione influenza fortemente l'immissione dei componenti dell'aerosol atmosferico nella libera troposfera.

Mentre le misure chimiche ottenute su carote di ghiaccio possono fornire informazioni sull'impatto antropico nell'area del Monte Rosa e delle Alpi occidentali e sulla sua stagionalità, il particolato atmosferico è più legato ai contributi relativi al trasporto atmosferico a lunga distanza (dal Nord Africa), rispetto a quello locale (zone pianeggianti o limitrofe al Monte Rosa). Da questo si evince quanto sia naturale una stretta correlazione con gli studi dei caratteri fisici e meteorologici nella regione Alpina e quelli sulle carote di ghiaccio, ove la possibilità di un confronto reciproco delle informazioni è fondamentale quando si intende comprendere i cambiamenti globali del clima.

Le analisi cromatografiche hanno evidenziato gli andamenti tipici degli ioni maggiori: ammonio, nitrati e solfati presentano un caratteristico andamento stagionale (fig. 3), dovuto alle variazioni altitudinali dello strato limite planetario, che in estate si innalza al di sopra dei 5000 metri e permette l'ascesa degli inquinanti di origine locale. In inverno, invece, esso si abbassa sotto i 2000 metri (anche meno in Pianura Padana), così che la circolazione atmosferi-

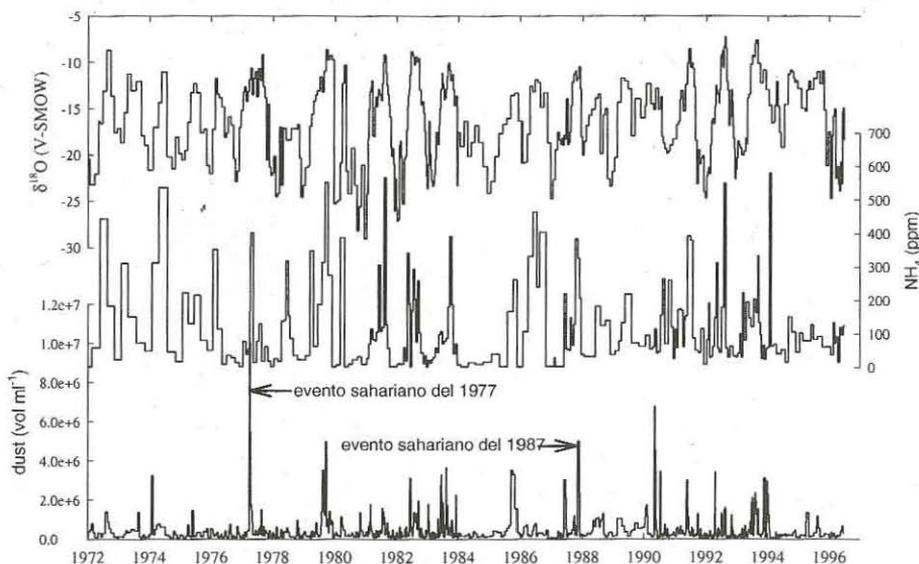


Fig. 2 - Datazione della carota utilizzando la variazione stagionale degli isotopi stabili ($\delta^{18}\text{O}$ - curva superiore), dell'ammonio (NH_4 - curva centrale) e la curva delle polveri sahariane ove sono segnati i due livelli, visibili, del 1977 e del 1987.

ca alle alte quote è caratterizzata da condizioni di libera circolazione troposferica. Il calcio e magnesio presentano massimi di concentrazione in corrispondenza degli eventi sahariani; sodio e cloruri sono privi di stagionalità e di periodicità pluri-annuale, ma si osservano picchi ad alta concentrazione che possono venire associati a trasporti di aria ricca di aerosol marino (NaCl). Per i cloruri, evidentemente non possono essere esclusi input antropici e/o vulcanici, i cui contributi sono ancora in fase di valutazione.

Sono stati calcolati i gradi di corrispondenza tra gli ioni, sia in base alla correlazione di Pearson, sia alla correlazione di Spearman: in entrambi i casi si osserva

un'elevata correlazione tra calcio e magnesio ($r^2 = 0,56$) e tra solfati e nitrati ($r^2 = 0,88$); la massima correlazione riscontrata è, ovviamente, tra sodio e cloruri con un valore di $r^2 = 0,99$; il potassio è correlato significativamente sia con il sodio ($r^2 = 0,66$), che con i cloruri ($r^2 = 0,62$).

L'analisi dei trend nel periodo dal 1972 al 1996 permette di osservare, con chiarezza, la diminuzione della concentrazione dei solfati legata ai cambi di nei regimi industriali con maggiore efficienza, ed all'introduzione di carburanti a basso tenore di zolfo nei cicli di produzione energetica ed industriale. La percentuale media dei solfati di origine crostale è stata valutata essere dell'ordine dello 0,1 % del bilancio globale

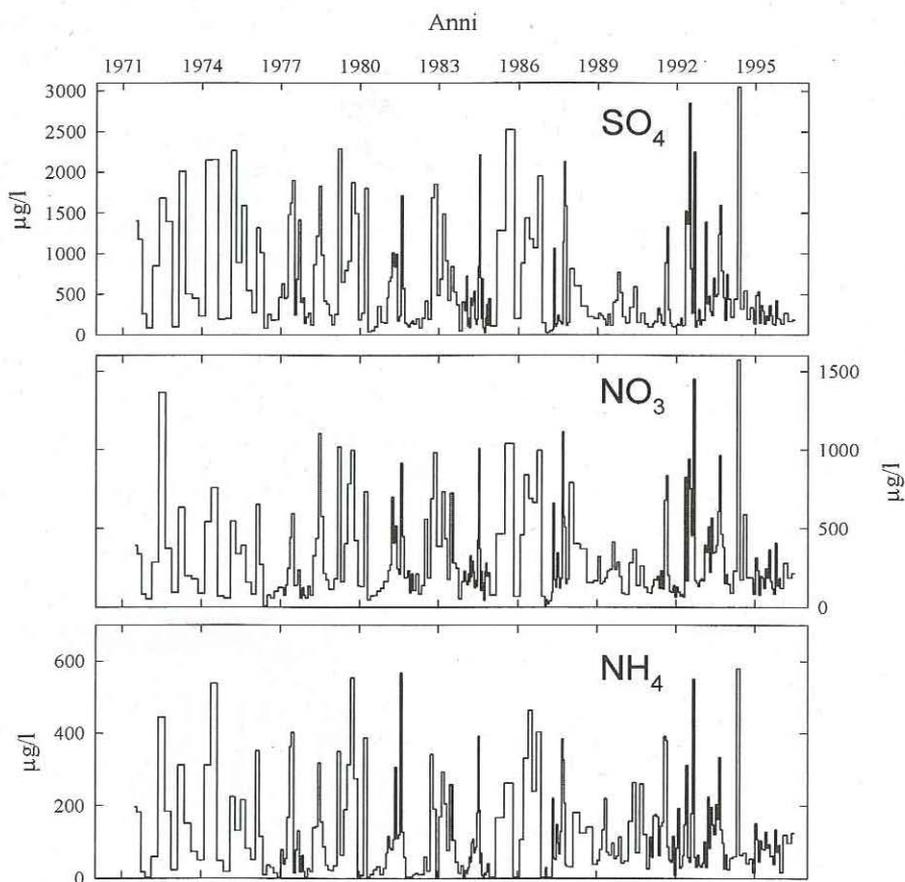


Fig. 3 – Andamento dei principali ioni di origine antropica, solfati, nitrati ed ammonio.

dei solfati, il 99 % del quale è attribuito ad input antropici. Molto diversi sono gli andamenti dell' ammonio e dei nitrati, che non presentano particolari trend nell'arco temporale considerato. La variabilità inter-annuale osservata può essere principalmente attribuita a variazioni dell' accumulo nevoso (fig. 4).

Le analisi del particolato insolubile (fig. 5), effettuate con il contatore di particelle in liquido, hanno evidenziato una serie di eventi estremi di trasporto eolico di materiale crostale dalle aree desertiche del nord-Africa tra il 1972 e il 1996 ed hanno confermato che in concomitanza di tali eventi, le nevi delle alte quote si arricchiscono di calcio e magnesio, tipici elementi crostali. È stato calcolato il flusso di calcio per i campioni sahariani, che è risultato pari al 20 % del flusso totale di calcio per l'intera carota; il confronto con i dati di letteratura relativi a studi effettuati al Col du Dôme, mostra un'elevata somiglianza tra i due siti, in quanto in quest'ultimo il flusso di calcio derivante da trasporto di particolato sahariano è il 22 % del flusso totale (MAUPETIT *et al.*, 1995). Dalle misure delle polveri insolubili non è stato possibile identificare un chiaro andamento stagionale, anche perché esistono delle difficoltà nel definire gli eventi sahariani di piccola intensità (generalmente primaverili-estivi) con l'andamento locale delle polveri, che presenta una certa variabilità intrinseca.

Analisi statistiche multivariate, come la Cluster Analysis e l'Analisi dei Componenti Principali, costituiscono strumenti potenti per comprendere le relazioni esistenti tra le varie specie chimiche. Tali indagini statistiche, effettuate sulle carote del Colle del Lys, hanno permesso di individuare tre sorgenti principali dell'aerosol che raggiunge l'area del Monte Rosa (UGLIETTI, 2001). La prima sorgente è costituita da solfati, nitrati e ammonio, la cui origine è antropica, legata principalmente alle attività agricole e industriali esercitate nell'area della Pianura Padana. Anche se i contributi naturali possono giocare un ruolo non secondario, si può mettere in evidenza un netto parallelismo tra le variazioni delle emissioni

antropiche e i trend delle concentrazioni dei relativi marker chimici misurati nella neve. Il fattore indicante la sorgente marina è caratterizzato da elevate correlazioni del

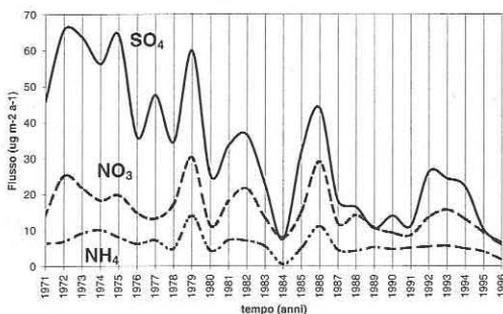


Fig. 4 - Andamenti medi dei principali ioni di origine antropica con l'evidente trend in diminuzione dei solfati.

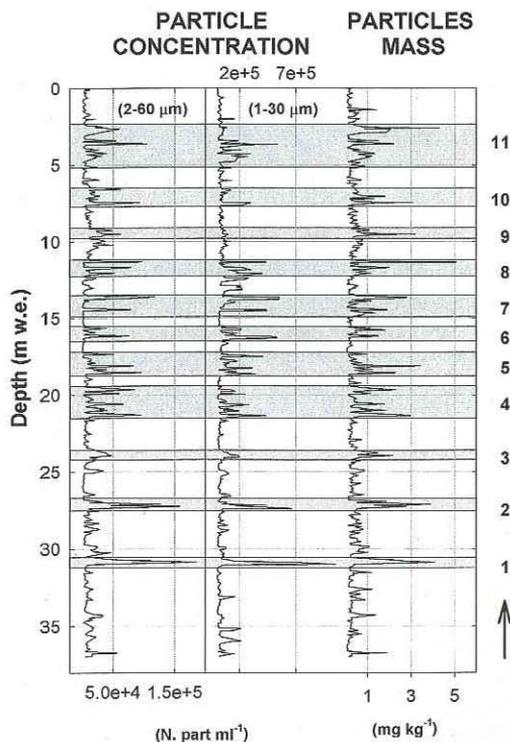


Fig. 5 - Curve delle polveri insolubili, in volume (su due range dimensionali) ed in massa (circa a destra) con definiti i periodi di maggiore afflusso sahariano, identificati dalle aree in grigio.

sodio con i cloruri e, in misura meno evidente, con il potassio. Il valore del rapporto Cl/Na, vicino a quello indicante la composizione dell'acqua di mare, conferma la prevalente fonte marina dei due componenti, nonostante che il contributo antropico ai cloruri (emissioni di HCl) non possa essere ritenuto trascurabile. La sorgente tipicamente crostale è individuata da elevati flussi di calcio e magnesio, fortemente correlati anche con il carico di polveri atmosferiche. L'analisi dei componenti principali permette di evidenziare un quarto fattore, legato alle variazioni della concentrazione del potassio. Nonostante la principale fonte crostale, il potassio ha, infatti, rilevanti contributi dallo spray marino e da emissioni legate ai cicli biologici vegetativi, così che le sue variazioni nell'aerosol risultano di natura complessa.

Conclusioni e lavori futuri

Il Colle del Lys rappresenta un sito di particolare interesse per lo studio delle variazioni climatiche ed ambientali nell'Area Alpina. La composizione chimica e il carico di polveri nelle deposizioni nevose mostrano una forte somiglianza con quanto osservato a Col du Dome sul Monte Bianco con una risoluzione temporale molto simile. Inoltre questi siti, associati al Colle Gnifetti, permettono di ottenere informazioni su un intervallo di degli ultimi 300 anni (UGLIETTI, 2001).

Una migliore caratterizzazione del particolato insolubile può essere fornita dall'analisi del contenuto di ferro e di alluminio e dalla valutazione del pH. Ferro e alluminio sono considerati, infatti, attendibili indicatori crostali dei depositi sahariani nelle nevi alpine. Le elevate quantità di polveri alcaline (principalmente carbonati e bicarbonati), evidenziate da massimi di concentrazione di Ca e Mg, svolgono un ruolo importante nell'equilibrio acido/base dell'atmosfera, attraverso la loro elevata capacità neutralizzante.

Una stratigrafia continua di selezionati

composti organici misurati in carote prelevate sul Colle del Lys potrebbe costituire un record storico delle emissioni antropiche negli ultimi decenni. In particolare, anche grazie al confronto con quanto osservato in altri siti (es. Col du Dôme, Monte Bianco), potrebbero essere valutati gli effetti delle deposizioni su scala regionale di sostanze originate da processi di combustione naturali (incendi boschivi) o accidentali (ad esempio: l'incendio avvenuto nel traforo del Monte Bianco nel 1999).

I dati ottenuti dalle analisi chimiche e fisiche sulle carote del Colle del Lys, integrati con studi meteorologici e con l'inventario delle emissioni antropiche, potrà permettere il settaggio di modelli capaci di correlare le variazioni climatiche con le modificazioni ambientali dovute sia a processi naturali che alle attività umane.

Ringraziamenti

Le attività sul Colle del Lys sono state finanziate con fondi del Ministero della Pubblica Istruzione (MIUR - ex 40%), dall'Istituto Nazionale di Ricerca sulla Montagna (INRM), dall'Istituto Superiore di Previdenza e Sicurezza sul Lavoro (ISPESL), Progetto ALPCLIM finanziato dall'Unione Europea ed in stretta collaborazione con l'ENEL.

dott. Valter Maggi

dott.ssa Paola Casati

dott.ssa Chiara Uglietti

dott.ssa Federica Marino

Dip. di Scienze dell'Ambiente e del Territorio
Università di Milano Bicocca
Piazza della Scienza, 1 - 20126 Milano
e-mail: valter.maggi@unimib.it

dott.ssa Barbara Stenni

dott. Onelio Flora

Dip. di Scienze della Terra
Università di Trieste
Via Weiss 2, Trieste

dott. Roberto Udisti

Dip. di Chimica
Università di Firenze
Via della Lastruccia, 3, Sesto Fiorentino, Firenze

BIBLIOGRAFIA

DELMAS R., 1992 - *Environmental information from Ice Cores*. Rev. of Geophysics, vol. 30: 1-21.

GRIP MEMBERS, 1993 - *Climatic instability during the last interglacial period revealed in the Greenland summit ice*. Nature, 364, 203-207.

HAEBERLI W., ALEAN J., 1985 - *Temperature and accumulation of high altitude firn in the Alps*. Annals of Glaciology, 6: 161-163.

HAEBERLI W., SCHMID W., WAGENBACH D., 1988 - *On the geometry, flow and age of firn and ice at the Colle Gnifetti core drilling site (Monte Rosa, Swiss Alps)*. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 24: 1-19.

JOHNSON S.J., CLAUSEN H.B., DANSGAARD W., FUHRER K., GUNDESTRUP N., HAMMER C.U., IVERSEN P., JOUZEL J., STAUFFER B., STEFFENSEN J.P., 1992 - *Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core*. Nature, 359: 311-313.

JOUZEL J., BARKOV N.I., BARNOLA J.M., BENDER M.; CHAPPELLAZ J., GENTHON C., KOTLYAKOV V.M., LIPENKOV V., LORIS C., PETIT J.R., RAYNAUD D., RAISBECK G., RITZ C., SOWERS T., STIEVENARD M., YIOU F., YIOU P., 1993 - *Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period*. Nature, 364: 407-412.

MAGGI V., SMIRAGLIA C., NOVO A., CASATI P., DELMONTE B., JOHNSTON P., ROSSI G., 2000 - *Ice core drilling on Colle del Lys (Monte Rosa, Italian Alps): Climate and environmental signals*. Bollettino Geofisico, v. XXIII: 57-66.

MAUPETIT F., WAGENBACH D., WEDDELING P., DELMAS R.J., 1995 - *Seasonal fluxes of major ions to a high-altitude cold alpine glacier*. Atmosph. Environ., 29(1): 1-9.

PETIT J. R., JOUZEL J., RAYNAUD D., BARKOV N. I., BARNOLA J. M., BASILE I., BENDER M., CHAPPELLAZ J., DAVIS M., DELAYGUE G., DELMOTTE M., KOTLYAKOV V. M., LEGRAND M., LIPENKOV V. Y., LORIS C., PEPIN L., RITZ C., SALTZMAN E., STIEVENARD M., 1999 - *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core*. Antarctica. Nature, 399: 429-436.

ROSSI G., NOVO A., MAGGI V., OROMBELLI G., SMIRAGLIA C., 1998 - *Carottage profond sur le glacier du Lys (Monte Rosa): résultats préliminaires*. La Houille Blanche, 5/6: 22-25.

SMIRAGLIA C., MAGGI V., NOVO A., ROSSI G., JOHNSTON P., 2000 - *Preliminary results of two ice core drillings on Monte Rosa (Colle Gnifetti and Colle del Lys), Italian Alps*. Geografia Fisica Dinamica Quaternaria, 23: 165-172.

UGLIETTI C., 2001 - *Flussi degli ioni maggiori del particolato atmosferico in una carota di ghiaccio del Colle del Lys (Monte Rosa)*. Tesi di Laurea, CdL Scienze Ambientali, Università di Milano Bicocca.

WAGENBACH D., 1989 - *Environmental records in Alpine glaciers*. In: H. Oeschger & C.C. Langway (eds.), *The environmental record in glaciers and ice sheets*, Wiley & Sons, 69-83.

Summary

The high altitude Alpine glacier represent the best archive of environmental, climatic and atmospheric information. 80 m of ice core, summer 1996, drilled in the Colle del Lys (Monte Rosa, Valle d'Aosta), permit to evaluate the history of the major chemical atmospheric compound, natural and anthropogenic, from the beginning of '70s. Stable isotope permit the interpretation of the temperature variability of the atmosphere at the site. The decrease of the sulphates related to the changes of the burning fuels on the power plants and the efficiency of the industrial systems are well described on the ice core record. Nitrate, ammonia and other major compound describe differences in concentration in the last 30 years. Atmospheric dust and fine particles was detected both from the atmospheric background, from anthropogenic origin and from North African long range transport events.

Riassunto

I ghiacci di alta quota rappresentano tra i più importanti archivi di informazioni ambientali, climatiche ed atmosferiche. Una perforazione, nell'estate del 1996, effettuata al Colle del Lys (Monte Rosa, Valle d'Aosta) ha permesso di valutare l'evoluzione nel tempo del carico chimico dei principali composti atmosferici di origine naturale ed antropica, a partire dall'inizio degli anni 70. La misura degli isotopi stabili dell'ossigeno ha permesso di effettuare valutazioni sulla variazione della temperatura dell'aria nel sito. E' stato osservato il decremento dei solfati legato ai cambi nei carburanti fossili utilizzati nelle centrali termoelettriche ed al miglioramento in efficienza nel loro uso nel comparto industriale. Inoltre nitrati, ammonio e altri composti chimici maggiori mostrano trend differenti negli ultimi 30 anni. La misura delle polveri atmosferiche ha fornito importanti indicazioni sulla concentrazione del particolato fine locale, di origine antropica e derivante da eventi di trasporto a lunga distanza dal Nord Africa.